

Національна академія наук України
Інститут електродинаміки

ПУШКАР МИКОЛА ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 621.313.3

**САМОЗБУДЖЕННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ В
АВТОНОМНИХ СИСТЕМАХ ГЕНЕРАЦІЇ З АСИНХРОННИМИ
ГЕНЕРАТОРАМИ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: – кандидат технічних наук, доцент
Печеник Микола Валентинович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор
Мазуренко Леонід Іванович,
Інститут електродинаміки НАН України, завідувач відділу електромеханічних систем.

– кандидат технічних наук, доцент
Зачепа Юрій Володимирович
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри систем автоматичного управління та електроприводу.

Захист відбудеться «6» грудня 2016 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради 26.187.01 в Інституті електродинаміки НАН України, за адресою: 03680, м. Київ, проспект Перемоги, 56, тел. 456-91-15.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України за вищевказаною адресою.

Автореферат розісланий « 3 » листопада 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю. М. Гориславець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Автономні системи генерації (АСГ) є незамінним джерелом електричної енергії у віддалених малонаселених місцевостях, де прокладання ліній електропостачання є витратним і в умовах обмежених ресурсів не реалізується, а також в місцевостях, доступ до яких ускладнений (гірська місцевість, острови і т.д).

Одними з основних вимог для АСГ є високі надійність та мобільність при мінімальній вартості. Впровадження таких систем і відповідно генерована ними електроенергія залишаються все ще достатньо дорогими, що викликає необхідність проведення досліджень, спрямованих на підвищення їхньої ефективності.

Актуальність роботи. Широкого застосування в АСГ набувають асинхронні генератори із самозбудженням (АГ), перевагою яких є дешевизна, надійність та відсутність потреби в додатковому джерелі живлення, так як необхідна для збудження реактивна потужність отримується від ємностей, під'єднаних до генератора. Основними проблемами АСГ на базі АГ з самозбудженням є нелінійна залежність частоти та амплітуди генерованої напруги від навантаження та обмежений діапазон швидкостей генератора, за яких підтримується самозбудження. Відомі методи досліджень АГ ґрунтуються на схемах заміщення, що викликає необхідність використання числових ітераційних методів розв'язання нелінійних алгебраїчних рівнянь для побудови статичних характеристик та визначення границь самозбудження.

Останнім часом набуває поширення метод аналізу АСГ з АГ, який ґрунтується на положеннях теорії автоматичного керування з використанням диференціальних матричних рівнянь для опису генератора. При цьому процес самозбудження аналізується з точки зору стійкості системи. Це дозволяє отримати аналітичні залежності для аналізу особливостей таких АСГ.

АГ із самозбудженням є складною нелінійною системою: спочатку у системі необхідно створити умови нестійкості, які дозволяють зрушити нульове положення рівноваги, а далі перейти до стійкого положення рівноваги, при якому здійснюється генерація електроенергії. При функціонуванні системи збурення не повинні виходити за певні межі, щоб не призвести до втрати стійкості – колапсу напруги. Особливою складністю при керуванні АСГ на основі АГ з самозбудженням є залежність і частоти, і амплітуди генерованої напруги від навантаження, швидкості первинного двигуна, ємностей конденсаторів. Тому дослідження, спрямовані на підвищення якості регулювання в АСГ за рахунок встановлення аналітичних залежностей, які дозволяють оцінювати статичні характеристики робочих режимів АГ у складі АСГ, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились у 2010-2014 роках, за науковим напрямком кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ «КПІ» та держбюджетної теми «Основи теорії векторно-керованих електромеханічних систем змінного струму з кінематичною парою кочення» № 2511-ф, номер державної реєстрації 0112U002404, в якій автор був співвиконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток методу аналізу процесів самозбудження з використанням диференціальних ма-

тричних рівнянь, спрямований на підвищення якості регулювання напруги та потужності в автономних системах генерації на основі асинхронних генераторів з конденсаторним збудженням, шляхом удосконалення підходів до керування параметрами АСГ за рахунок встановлення аналітичних залежностей між ними.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні задачі:

1. Формулювання задачі дослідження і обґрунтування необхідності її вирішення на основі огляду існуючих підходів до дослідження процесів самозбудження асинхронних генераторів, статичних режимів та систем регулювання напруги і потужності в АСГ з АГ.

2. Розроблення математичної моделі АСГ з АГ при роботі з активно-індуктивним навантаженням для аналізу робочих режимів АСГ.

3. Встановлення аналітичних виразів для границь самозбудження АГ при різних варіантах навантаження та схемах підключення конденсаторів самозбудження.

4. Одержання аналітичних залежностей для статичних характеристик вихідної напруги та максимальної статичної перевантаженості АСГ з метою аналізу та розробки систем керування напругою та максимізації потужності в АСГ.

5. Розробка методу аналізу критичних режимів роботи АГ за допомогою аналітичних виразів для його статичних характеристик.

6. Створення пакету моделюючих програм з метою дослідження та аналізу статичних та динамічних режимів роботи АГ в складі АСГ.

7. Створення лабораторних установок для експериментального дослідження границь самозбудження АГ, а також статичних та динамічних режимів роботи систем керування напругою АСГ.

Об'єктом дослідження є автономні системи генерації електричної енергії з асинхронними генераторами із самозбудженням.

Предметом дослідження є процеси електромеханічного перетворення енергії в автономних асинхронних генераторах із самозбудженням.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувались: теорія аналізу матричних рівнянь, методи теорії узагальнених електромеханічних перетворювачів енергії та теорії автоматичного керування. Встановлені аналітичні залежності верифіковані методом математичного моделювання і лабораторно-стендовими випробуваннями.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку теорії асинхронних генераторів і встановленні нових аналітичних залежностей для визначення границь самозбудження, статичних характеристик АГ та умов стійкості АСГ, які дозволяють проводити аналіз умов самозбудження, режимів роботи системи генерації та спрощують дослідження АСГ на етапі проектування.

При виконанні дисертаційної роботи отримано наступні нові наукові результати:

1. Розвинуто метод дослідження асинхронних генераторів, який ґрунтується на положеннях теорії автоматичного керування і, за рахунок використання диференціальних матричних рівнянь симетричної структури, дозволяє проаналізувати процеси самозбудження з точки зору стійкості робочих режимів асинхронного генератора в автономній системі живлення.

2. Отримано нові аналітичні залежності, які на відміну від відомих дозволяють встановити взаємозв'язки між напругою, частотою обертання, ємністю конденсаторів збудження та величиною навантаження, які доцільно використовувати в автономних системах генерації з асинхронними генераторами з метою підвищення якості стабілізації напруги в межах зон самозбудження.

3. Вперше встановлено аналітичні залежності, що відображають вплив величини ємності конденсаторів збудження та навантаження на вихідну потужність асинхронних генераторів автономної системи генерації, використання яких в системах керування дозволяє створити умови максимальної статичної перевантаженості генераторів.

Практичне значення одержаних результатів. При виконанні дисертаційної роботи отримано наступні практичні результати:

1. Встановлені в дисертаційній роботі аналітичні залежності доцільно використовувати для визначення робочих зон системи генерації шляхом розрахунку границь самозбудження та критичних навантажень із подальшим їх застосуванням при розробці і проектуванні систем керування АСГ, а також в якості обмежень в нових та існуючих системах для уникнення колапсу напруги, який призводить до перезапуску генераторів.

2. Одержані в роботі вирази для генерованої потужності дозволяють розробляти автоматичні пошукові системи максимуму статичної перевантаженості.

3. Використання встановлених аналітичних залежностей частоти та напруги дозволяють розробити системи бездатчикового керування без ітераційного розрахунку параметрів, що забезпечують номінальну напругу.

4. Розроблено комплекс програмних та технічних засобів для дослідження і реалізації автономних систем генерації з АГ, що дозволяють проводити повномасштабне тестування статичних і динамічних характеристик автономних енергогенеруючих систем.

5. Розроблено дві експериментальні установки для дослідження автономних систем генерації з асинхронними генераторами, що дозволяють проводити експериментальну верифікацію отриманих в роботі аналітичних залежностей, а також досліджувати системи регулювання напруги, частоти, потужності асинхронних генераторів в складі АСГ при різних схемах самозбудження та навантаженнях.

Результати роботи впроваджено в ТОВ «Проектно-дизайнерське бюро «АТОН» при розробці нових автономних систем енергозабезпечення та ПП «Баркософт» при проектуванні системи автономного електропостачання сільськогосподарського комплексу.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «КПІ» при підготовці дипломних проектів та магістерських дисертацій, а також в курсах спеціальності 7.05070204 і 8.05070204 - «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», при вивченні дисципліни «Теорія електроприводу».

Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і результати, викладені в дисертації, отримані автором особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належить: в роботі [1] – встановлено аналітичні залежності для зон самозбудження АГ; [2,3] – перевірено встановлені аналітичні залежності експериментально та шляхом математичного моделювання; [4], [5] – автором проведено експериментальні дослідження та математичне моделювання з метою верифікації отриманих результатів; [6] – запропоновано та описано методику використання отриманих аналітичних залежностей при проектуванні системи регулювання напруги; в роботах [7,8] – запропоновано технічні рішення для практичної реалізації системи керування напругою в АСГ на базі АГ.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, результати та висновки дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних конференціях: IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) (м. Неаполь, Італія, 2014 р.), XV, XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Теорія і практика.» (м. Кременчук, 2014-2015 р.р.), Міжнародна науково-технічна конференція XVIII, XIX «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика.» (м. Одеса, 2011 р., м. Миколаївка, 2012 р.), 28-а всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційний потенціал української науки – XXI сторіччя» (м. Львів, 2014 р.), Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2012 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано у 8 наукових працях, у тому числі: 6 статей у наукових фахових виданнях України (з них 5 – у виданнях, які включені до міжнародних науково-метричних баз, в тому числі одна в SCOPUS) та у 2 тезах доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях (з них 1 – в працях конференції IEEE, яка індексується в базі SCOPUS).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 203 сторінки, до якого входить 120 сторінок основного тексту, 73 рисунки, 137 найменувань використаних джерел та 8 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі наукового дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну, практичне значення і реалізацію результатів дисертаційних досліджень, надано дані про їх апробацію, публікацію та впровадження.

У першому розділі проведено аналіз відомих наукових публікацій в області самозбудження АГ, АСГ та систем керування їх напругою. Аналітичний огляд показує, що існуючі підходи до аналізу процесу самозбудження базуються на схемах заміщення асинхронної машини і не дозволяють отримувати аналітичні залежності як для зон самозбудження, так і для статичних характеристик асинхронного генератора у складі АСГ, що не дає можливості врахувати всі

обмеження та взаємозв'язки між параметрами системи на етапі проектування АСГ для уникнення аварійних режимів, які можуть призвести до погіршення якості генерування електричної енергії або колапсу напруги.

Розглянуто типові схеми АСГ на базі АГ, описано тенденції щодо розробки таких систем та сфери їх застосування.

На підставі проведеного аналізу зроблено висновок про необхідність розвитку аналітичних методів дослідження процесів самозбудження АГ та його статичних характеристик на базі підходів з використанням диференціальних матричних рівнянь з метою створення нових покращених автономних систем генерації електричної енергії.

У другому розділі одержали подальший розвиток метод аналізу АГ та теорія генерування електричної енергії в автономних системах з асинхронними генераторами, які мають конденсаторне збудження. Досліджено процеси самозбудження АГ та взаємозв'язки між параметрами АСГ та процесами самозбудження з точки зору стійкості системи.

Математична двофазна модель симетричного АГ, представлена в системі координат (F–G), що обертається з довільною кутовою швидкістю ω_e , має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_S}{dt} &= \mathbf{U}_S - R_S \mathbf{i}_S - \omega_e \mathbf{J} \Psi_S; \\ \frac{d\Psi_R}{dt} &= -R_R \mathbf{i}_R + (n_p \omega - \omega_e) \mathbf{J} \Psi_R; \\ \mathbf{J} &= \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\Psi_S = (\Psi_{SF} \quad \Psi_{SG})^T$, $\Psi_R = (\Psi_{RF} \quad \Psi_{RG})^T$ – вектори потокозчеплень статора і ротора; $\mathbf{i}_S = (i_{SF} \quad i_{SG})^T$, $\mathbf{i}_R = (i_{RF} \quad i_{RG})^T$ – вектори струмів статора і ротора; $\mathbf{U}_S = (U_{SF} \quad U_{SG})^T$ – вектор напруги статора; R_S , R_R – активні опори фаз статора та ротора; n_p – число пар полюсів, ω – кутова швидкість обертання ротора АГ, ω_e – кутова швидкість обертання довільної системи координат.

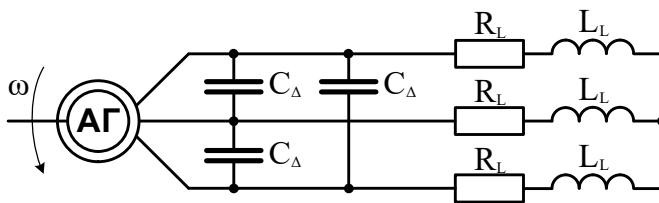


Рис. 1

Активно-індуктивне навантаження АСГ підключається послідовно до обмоток статора АГ, а конденсатори для самозбудження – паралельно (рис. 1). Таким чином, для опису процесів в АСГ система рівнянь (1) доповнюється двома додатковими векторними рівняннями:

$$\begin{aligned} -C \frac{d\mathbf{U}_S}{dt} &= \mathbf{i}_S + \mathbf{i}_L + \omega_e C \mathbf{J} \mathbf{U}_S; \\ Y_L L_L \frac{d\mathbf{i}_L}{dt} &= Y_L \mathbf{U}_S - \mathbf{i}_L - \omega_e Y_L L_L \mathbf{J} \mathbf{i}_L; \end{aligned} \quad (2)$$

де i_L – струм навантаження, Y_L – провідність активної компоненти навантаження, L_L – індуктивність навантаження, C – ємність самозбудження. Величини навантажень та ємностей в кожній фазі є однаковими.

Потокозчеплення статора та ротора визначаються рівняннями

$$\Psi_S = L_{\sigma S} i_S + L_M (i_S + i_R); \quad \Psi_R = L_{\sigma R} i_R + L_M (i_S + i_R), \quad (3)$$

де $L_{\sigma S}$ та $L_{\sigma R}$ – індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора, L_M – взаємна індуктивність статора та ротора (індуктивність намагнічування), яка, в наслідок насичення магнітної системи, нелінійно залежить від струму намагнічування $L_M = f(i_M)$,

$$i_M = \sqrt{i_{MF}^2 + i_{MG}^2}, \quad i_{MF} = i_{SF} + i_{RF}, \quad i_{MG} = i_{SG} + i_{RG}. \quad (4)$$

На основі наведених виразів, після диференціювання потокозчеплень (3) відносно часу (із врахуванням нелінійності L_M) та підстановки цих виразів в (1), автором отримана модель АСГ, яка має форму неявного нелінійного матричного диференціального рівняння:

$$\mathbf{E}(\mathbf{X})\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(\mathbf{X})\mathbf{X}, \quad (5)$$

$$\text{де} \quad \mathbf{X} = [U_{SF} \quad i_{SF} \quad i_{RF} \quad i_{LF} \quad U_{SG} \quad i_{SG} \quad i_{RG} \quad i_{LG}]^T, \quad \mathbf{E}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_F & \mathbf{E}_{FG} \\ \mathbf{E}_{FG} & \mathbf{E}_G \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 & -\mathbf{F}_2 \\ \mathbf{F}_2 & \mathbf{F}_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_F = \begin{bmatrix} -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma S} + L_{MF} & L_{MF} & 0 \\ 0 & L_{MF} & L_{\sigma R} + L_{MF} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_L L_L \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_G = \begin{bmatrix} -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma S} + L_{MG} & L_{MG} & 0 \\ 0 & L_{MG} & L_{\sigma R} + L_{MG} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_L L_L \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_{FG} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{MFG} & L_{MFG} & 0 \\ 0 & L_{MFG} & L_{MFG} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -R_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_R & 0 \\ Y_L & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} C\omega_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_e(L_{\sigma S} + L_M) & -\omega_e L_M & 0 \\ 0 & (n_p \omega - \omega_e)L_M & (n_p \omega - \omega_e)(L_{\sigma R} + L_M) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_e Y_L L_L \end{bmatrix},$$

$$L_{MF} = L_M + (L - L_M)i_{MF}^2 / i_M^2, \quad L_{MG} = L_M + (L - L_M)i_{MG}^2 / i_M^2, \quad L_{MFG} = (L - L_M)i_{MF}i_{MG} / i_M^2.$$

В цій моделі $L = d\Psi_M / di_M = L_M + i_M dL_M / di_M$ – динамічна індуктивність намагнічування. Індуктивність намагнічування та динамічна індуктивність намагнічування є еквівалентними лише в лінійному магнітному колі.

Матриці $\mathbf{E}(\mathbf{X})$ і $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ – нелінійні функції вектора стану \mathbf{X} .

Проведено апроксимацію залежності індуктивності намагнічування $L_M = f(i_M)$ (рис. 2).

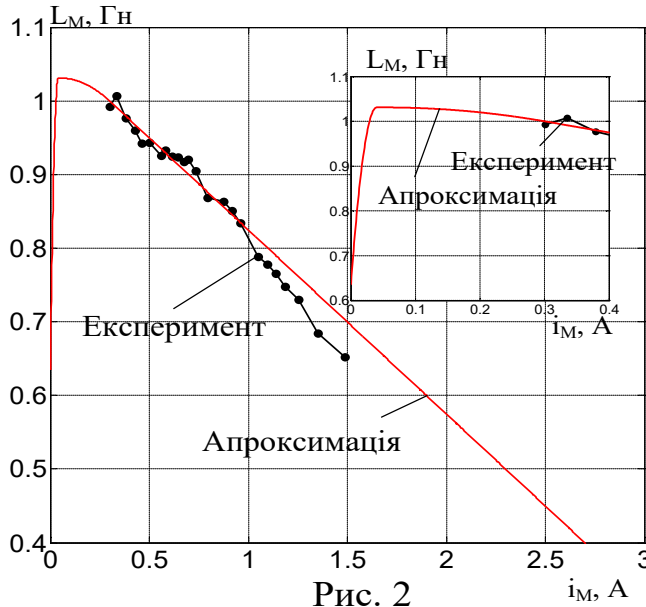


Рис. 2

Для першої ділянки $i_M < i_{M1}$ (наростаюча частина)
 $L_M = L_{MAX} - b_1(i_M - i_{M1})^2$. Для другої ділянки $i_{M1} < i_M < i_{M2}$ (горизонтальна частина): $L_M = L_{MAX}$.
 Для третьої ділянки $i_{M2} < i_M < i_{M3}$ (нелінійна спадна частина):
 $L_M = L_{MAX} - b_2(i_M - i_{M2})^2$. Для четвертої ділянки $i_M > i_{M3}$ (лінійна спадна частина):
 $L_M = L_{M3} - b_3(i_M - i_{M3})$.

Величини L_{MAX} , i_{M1} , i_{M2} ,

i_{M3} , визначено експериментально, а L_{M3} , b_1, b_2, b_3 – обираються такими, щоб апроксимована та експериментальна характеристики $L_M = f(i_M)$ знаходилися максимально близько одна від одної.

Умовою стійкості робочого режиму для системи (5) є рівність нулю усіх похідних координат вектора стану: $\dot{\mathbf{X}} = 0$ або $\det(\mathbf{F}(\mathbf{X})) = 0$. Матриця $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ має косиметричну структуру і визначення умов стійкості зводиться до розв'язку рівняння

$$(\mathbf{F}_1 + j\mathbf{F}_2)\mathbf{Z} = 0, \quad (6)$$

де $\mathbf{Z} = [U_{SF} \ i_{SF} \ i_{RF}]^T + j[U_{SG} \ i_{SG} \ i_{RG}]^T$.

Для оцінки стійкості робочих режимів проведено лінеаризацію рівняння (5) в околах точок рівноваги \mathbf{X}^* (робочих точок) методом кінцевих приростів. Записано рівняння (5) для збуреного руху $\mathbf{X} = \mathbf{X}^* + \delta\mathbf{X}$ та для статичного режиму при $\mathbf{X} = \mathbf{X}^*$, де $\delta\mathbf{X}$ – прирости координат вектора стану. Віднімаючи від рівняння збуреного руху рівняння для статичного режиму та нехтуючи малими другого та вищого порядків, отримано лінеаризоване рівняння в приростах в системі координат F – G , прив'язаній до струму намагнічування

$$\mathbf{E}^* \delta \dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{F}^* + \delta\mathbf{F}^*)\delta\mathbf{X} + \mathbf{F}_{YL}^* \delta Y_L + \mathbf{F}_C^* \delta C + \mathbf{F}_{\omega e}^* \delta \omega_e + \mathbf{F}_{\omega}^* \delta \omega, \quad (7)$$

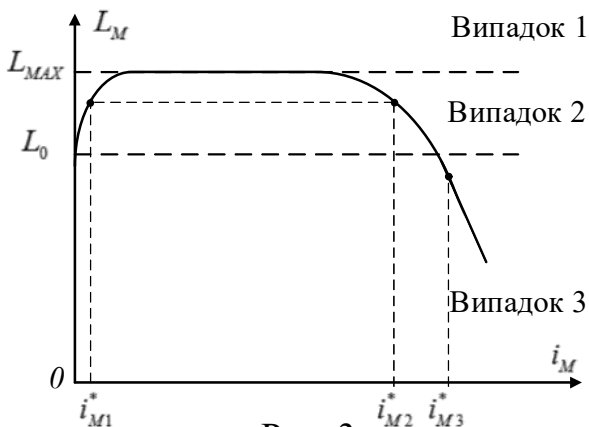


Рис. 3

де $\delta\mathbf{F}^*$, \mathbf{F}_{YL}^* , \mathbf{F}_C^* , $\mathbf{F}_{\omega e}^*$, \mathbf{F}_{ω}^* – відповідні матриці.

На рис. 3 представлено загальну форму кривої намагнічування генератора. Крива має три зони: наростаючу частину від L_{M0} до L_{MAX} , більш менш рівну частину під L_{MAX} , що відповідає лінійному магнітному режиму, та спадну частину, яка відповідає магнітному насиченню.

Аналіз цих зон, проведений в роботі, показав наступні властивості:

Випадок 1: коли $L_M^* > L_{MAX}$, генератор має лише один стан рівноваги, який відповідає $i_M^* = 0$ і є стійким.

Випадок 2: коли $L_{MAX} > L_M^* > L_{M0}$, генератор має три стани рівноваги $i_M^* = 0$ (стійкий), i_{M1}^* (нестійкий) відповідає наростаючій частині кривої та i_{M2}^* (стійкий) відповідає спадаючій частині кривої.

Випадок 3: коли $L_{M0} > L_M^*$, генератор має два стани рівноваги $i_M^* = 0$ (нестійкий) та i_{M3}^* (стійкий), який відповідає спадній частині кривої.

У випадку 1 самозбудження АГ є неможливим. У випадку 3 генерація електричної енергії та самозбудження є можливими і будуть відбуватися при як завгодно малому залишковому потоці в зв'язку з нестабільністю нульового стану. Таке явище має назву спонтанного самозбудження. У випадку 2 існує два можливих режими генерації. Якщо досягається нестійкий стан i_{M1}^* , тоді можливе як збудження, так і колапс напруги. Так як нульовий стан є стійким, то вийти з такого стану генератор самостійно не в змозі. Струм намагнічування потрібно зробити вищим або рівним i_{M1}^* , щоб досягти стабільного режиму генерації напруги i_{M2}^* . Тому залишковий магнітний потік має бути значно вищим, або ж потрібно застосувати зовнішні чинники для форсування самозбудження. Зазвичай використовують заздалегідь заряджені конденсатори для досягнення цього результату. Таке самозбудження носить назву тригерного самозбудження.

При аналізі АГ у складі АСГ необхідно визначати зони, в яких самозбудження є можливим. В ході дослідження були встановлені аналітичні залежності, за допомогою яких границя самозбудження отримується як залежність швидкості від ємності, а інші параметри є незмінними. Для випадку підключення конденсаторної батареї паралельно обмотці статора та активно-індуктивного навантаження аналітичні залежності мають вигляд:

$$\omega = \frac{\omega_e^*}{n_p} - \frac{R_R(1 + Y_L R_S) - \omega_e^{*2} C R_R (L_S^* + Y_L R_S L_L)}{n_p \omega_e^* \left(Y_L (L_S^* L_R^* - L_M^{*2}) + R_S L_R^* C - Y_L L_L \omega_e^{*2} C (L_S^* L_R^* - L_M^{*2}) + Y_L L_L L_R^* \right)}. \quad (8)$$

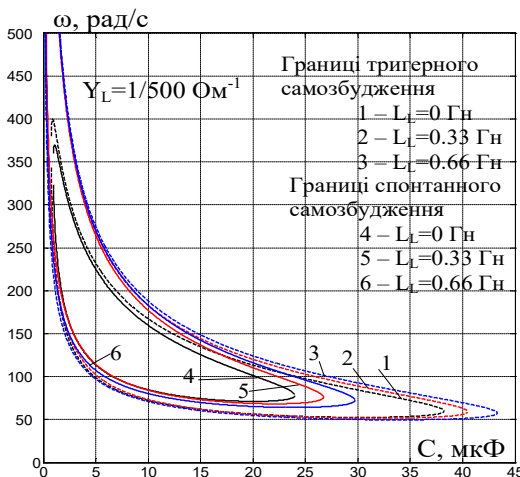


Рис. 4

Змінюючи C , розраховуються дві криві, які з'єднуються між собою в точках, коли досягається верхній та нижній ліміт ємності, створюючи замкнену область. Повторюючи цю процедуру для різних значень провідності та індуктивності навантаження, можна отримати сімейство кривих для зон самозбудження в координатах $C - \omega$ (рис. 4 для АГ АИРМ63В4У3). Встановлено, що додавання індуктивності може призводити як до зменшення, так і до збільшення критичної швидкості, при якій може відбутися самозбудження.

ня. Границі самозбудження завжди звужуються при зменшенні опору навантаження, якщо воно носить активний характер.

Аналогічно автором отримано математичну модель для випадку змішаного самозбудження АГ, коли до обмоток статора генератора підключаються паралельні і послідовні конденсатори. Таке підключення широко застосовується для покращення регулювання напруги в АСГ, але вплив послідовних ємностей на процес самозбудження АГ в літературі досі не розглядався.

Якщо послідовні конденсатори включені між паралельними та навантаженням (рис. 5,а), то таке підключення називається схемою “короткого шунта” (short-shunt), якщо послідовні конденсатори підключені між генератором та паралельними конденсаторами (рис. 5,б), то таке підключення називається схемою “довгого шунта” (long-shunt).

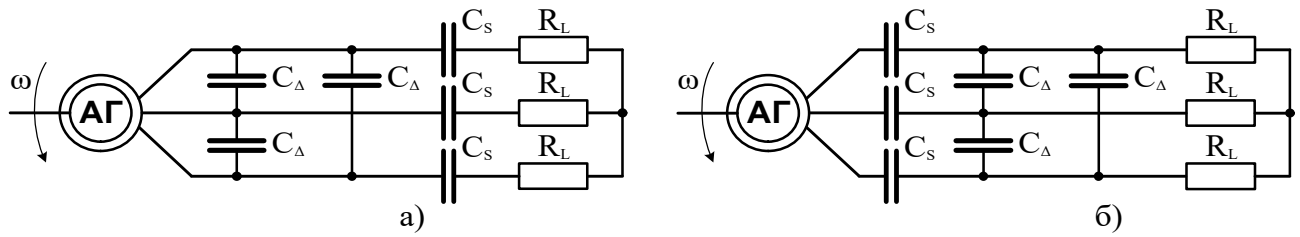


Рис. 5

За аналогією із випадком для паралельного самозбудження АГ була отримана математична модель системи для випадку змішаного підключення конденсаторів самозбудження:

$$\mathbf{E}(\mathbf{X})\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(\mathbf{X})\mathbf{X}, \quad (9)$$

$$\text{де } \mathbf{E}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_F & \mathbf{E}_{FG} \\ \mathbf{E}_{FG} & \mathbf{E}_G \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 & -\mathbf{F}_2 \\ \mathbf{F}_2 & \mathbf{F}_1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_F = \begin{bmatrix} -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma S} + L_{MF} & L_{MF} & 0 \\ 0 & L_{MF} & L_{\sigma R} + L_{MF} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_L C \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_G = \begin{bmatrix} -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma S} + L_{MG} & L_{MG} & 0 \\ 0 & L_{MG} & L_{\sigma R} + L_{MG} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_L C \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_{FG} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{MFG} & L_{MFG} & 0 \\ 0 & L_{MFG} & L_{MFG} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} 0 & a_S & 0 & 1 \\ 1 & -R_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_R & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b_L \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} C\omega_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_e(L_{\sigma S} + L_M) & -\omega_e L_M & 0 \\ 0 & (n_p \omega - \omega_e)L_M & (n_p \omega - \omega_e)(L_{\sigma R} + L_M) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C\omega_e R_L \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X} = [U_{SF} \quad i_{SF} \quad i_{RF} \quad i_{LF} \quad U_{SG} \quad i_{SG} \quad i_{RG} \quad i_{LG}]^T, \quad L_{MF} = L_M + (L - L_M)i_{MF}^2 / i_M^2,$$

$L_{MG} = L_M + (L - L_M)i_{MG}^2 / i_M^2$, $L_{MFG} = (L - L_M)i_{MF}i_{MG} / i_M^2$. $a_S = 1$ та $b_L = 1 + \frac{C}{C_S}$ для короткого шунта, а $a_S = 1 + \frac{C}{C_S}$ та $b_L = 1$ для довгого шунта.

За допомогою (9) встановлено аналітичні вирази для зон самозбудження АГ при змішаному збудженні:

$$\omega = \frac{1}{n_p} \left(\omega_e^* - \frac{\omega_e^* C R_R (b_L R_S + a_S R_L - C \omega_e^{*2} R_L L_S^*)}{C \omega_e^{*2} (C R_L R_S L_R^* + b_L (L_S^* L_R^* - L_M^{*2})) + L_R^* (1 - b_L a_S)} \right). \quad (10)$$

Використовуючи вираз (10), були отримані і проаналізовані зони самозбудження АГ для випадків короткого та довгого шунта (рис. 6 для АГ АИРМ63В4У3).

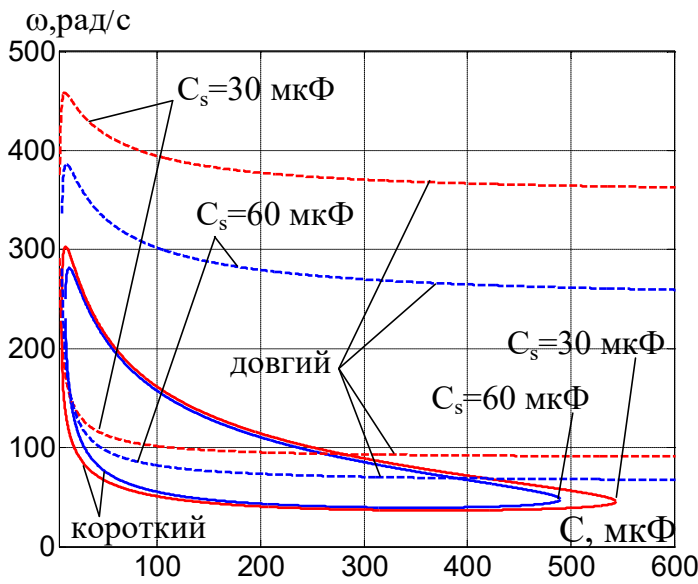


Рис. 6

вгого шунта. З однієї сторони це дає більший запас стійкості, проте з іншої – більше насичення магнітної системи генератора.

Розроблена математична модель АСГ з АГ з самозбудженням дозволяє отримати аналітичні вирази для границь самозбудження та статичних характеристик асинхронного генератора при роботі з активно-індуктивним навантаженням, а також проводити аналіз стійкості його робочих режимів. Дана модель враховує нелінійності кривої намагнічування АГ і дає високу точність результатів для границь самозбудження АГ в порівнянні з існуючими моделями.

Дослідження довели можливість побудови границь самозбудження асинхронного генератора без ітерацій. Отримано універсальні формули, які дозволяють здійснити це для конфігурацій паралельного і змішаного збудження по типах короткого та довгого шунтів.

У третьому розділі отримано статичні характеристики напруги та частоти для випадку роботи з активно-індуктивним навантаженням та проведено аналіз максимальної статичної перевантаженості АГ за допомогою розробленого математичного апарату.

Також аналітично отримано вирази для критичних навантажень, ємностей для швидкостей АГ, що дозволяють проводити теоретичні розрахунки та вибір

Конфігурація довгого шунта забезпечує ширші границі самозбудження, проте вони суттєво зсуваються вгору за швидкістю. Самозбудження генератора при короткому шунті можна забезпечувати при менших швидкостях. Оскільки для генерування напруги частотою 50 Гц необхідна приблизна швидкість 150 рад/с, то при невеликих значеннях ємності паралельних конденсаторів робочі точки знаходитимуться далі від границі самозбудження для короткого шунта, ніж для випадку довгого шунта.

обладнання для створення систем самозбудження та регулювання напруги генераторів.

Встановлено аналітичні залежності для струмів ротора, статора та навантаження АГ при роботі АСГ на R-L навантаження:

$$i_S^* = - \left(\frac{Y_L}{1 + j\omega_e^* Y_L L_L} + jC\omega_e^* \right) U_S^*, \quad (11)$$

$$i_R^* = \frac{1 + \left(\frac{Y_L}{1 + j\omega_e^* Y_L L_L} + jC\omega_e^* \right) (R_S + j\omega_e^* (L_{\sigma S} + L_M^*))}{j\omega_e^* L_M^*} U_S^*, \quad (12)$$

$$i_L^* = \frac{Y_L}{1 + j\omega_e^* Y_L L_L} U_S^*. \quad (13)$$

Також отримано вираз для генерованої напруги АГ:

$$|U_S^*| = \frac{\omega_e^* L_M^* i_M^* \sqrt{1 + \omega_e^{*2} Y_L^2 L_L^2}}{\sqrt{(1 + Y_L R_S (1 - C L_L \omega_e^{*2}) - C \omega_e^{*2} L_{\sigma S})^2 + \omega_e^{*2} (Y_L L_{\sigma S} (1 - C L_L \omega_e^{*2}) + C R_S + Y_L L_L)^2}}. \quad (14)$$

За допомогою отриманих виразів розраховано та експериментально верифіковано статичні залежності частоти (рис. 7) та амплітуди (рис. 8) генерованої напруги АГ від швидкості обертання генератора. Графіки підтверджують, що розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними є незначною.

Введення індуктивного навантаження зробило можливим зменшення падіння напруги в порівнянні з випадком суто активного навантаження, що обумовлено зменшенням провідності навантаження.

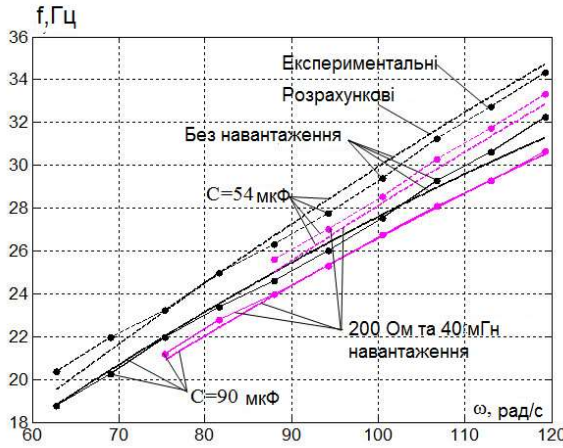


Рис. 7

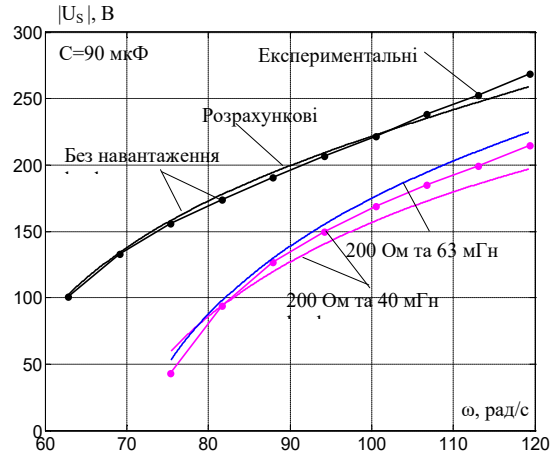


Рис. 8

Для певних типів споживачів електричної енергії (систем обігріву, освітлення та системи, які живляться постійною напругою через блоки живлення) не висуваються жорсткі вимоги до значення частоти та амплітуди генерованої напруги. Для таких систем необхідно забезпечувати максимальною активну потужність, яку може видавати генератор під час роботи. Отримано вираз для статичної перевантаженості

$$P_L^* = \frac{3Y_L (\omega_e^* L_M^* i_M^*)^2}{2(1 + Y_L R_S - C \omega_e^{*2} L_{\sigma S})^2 + \omega_e^{*2} (Y_L L_{\sigma S} + C R_S)^2}, \quad (15)$$

а також вираз, що визначає максимальну допустиму провідність навантаження,

$$\text{яке може жити АГ} \quad Y_{LCR} = \frac{(\sqrt{\sigma} - 1)^2}{4R_S\sqrt{\sigma}}, \quad (16)$$

де $\sigma = (L_S L_R - L_{MAX}^2) / (L_S L_R) > 0$, $L_S = L_{\sigma S} + L_{MAX}$, $L_R = L_{\sigma R} + L_{MAX}$.

За допомогою виразу (15) отримано тривимірні графіки розрахункових залежностей для границь самозбудження (крива 1 або крива 2 для двовимірного графіка) в залежності від генерованої потужності для різних генераторів (рис. 9 для АГ АИРМ63В4У3, рис. 10 для АГ Вк2208). Крива 3 показує точки максимумів функції.

Розрахунки доводять існування робочої точки максимальної потужності в зоні границь самозбудження.

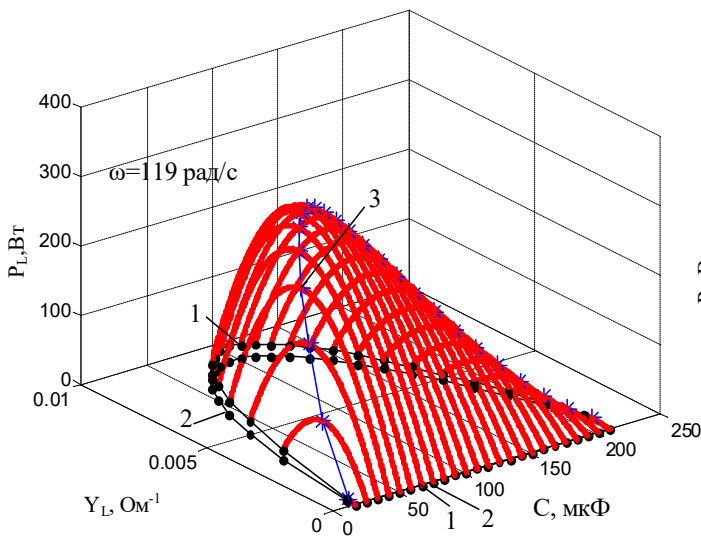


Рис. 9

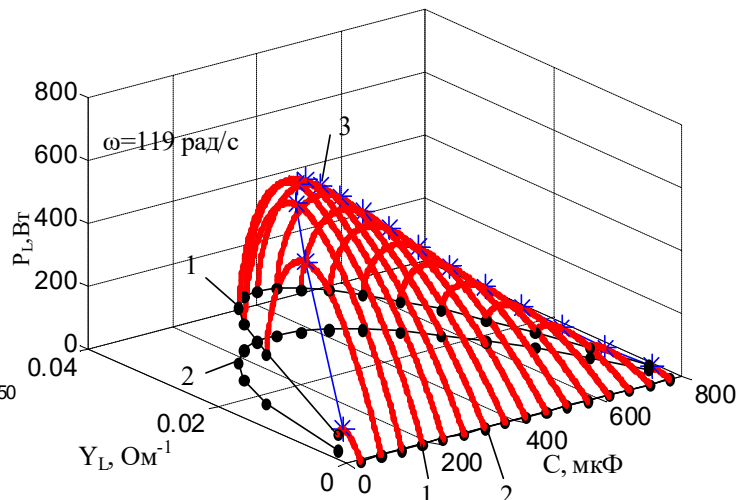


Рис. 10

Для конкретного значення навантаження може бути використаний алгоритм пошуку ємності, яка забезпечує максимальне значення функції $P_L^* = f(C)$. Алгоритм базується на перемиканні ємностей з фіксованим кроком з певною частотою. Вимірювання усталеної потужності проводиться після кожного перемикання. Якщо різниця між двома сусідніми вимірюваннями є додатною, тоді проводиться ще одна комутація на збільшення ємності. Якщо ж різниця стає від'ємною, то проводиться комутація на зменшення ємності. В результаті отримується послідовність стійких станів з коливаннями навколо точки максимуму перевантаженості. Значення часу комутації визначає частоту цих коливань, а кількість кроків зміни ємності визначає їх амплітуду та час пошуку максимуму. Під час цього пошуку можуть бути враховані певні обмеження на величину амплітуди генерованої напруги.

Встановлені в цьому розділі залежності дозволяють аналітично визначити параметри необхідного обладнання для розробки автономних енергогенеруючих систем на основі АГ із самозбудженням. Тривимірні графіки границь самозбудження можуть бути використані при розробці стратегій керування АГ для забезпечення кращих показників якості роботи систем керування ним та визначення навантаження для генератора.

Четвертий розділ присвячено експериментальному тестуванню отриманих результатів та їх впровадженню в системи керування напругою АГ в складі АСГ. Дослідження виконано на двох експериментальних установках.

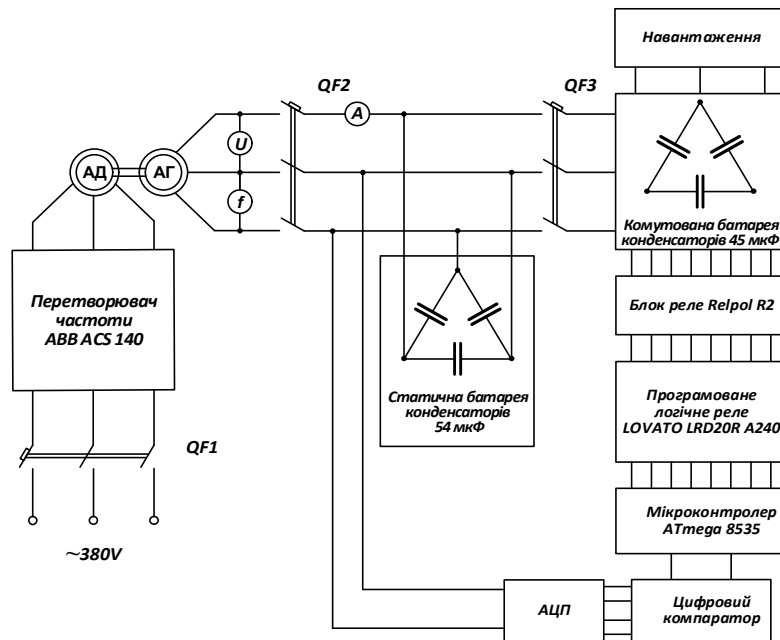


Рис. 11

Установка, побудована за схемою рис. 11, використовувалась для експериментальної верифікації отриманих аналітичних залежностей для зон самозбудження та статичних характеристик АГ. Тестування виконувалось для двох асинхронних машин з короткозамкненим ротором: АИРМ63В4У3 (потужність 370 Вт, номінальна частота обертання 1450 об./хв.) та Вк2208 (потужність 750 Вт, номінальна частота обертання 1450 об./хв.).

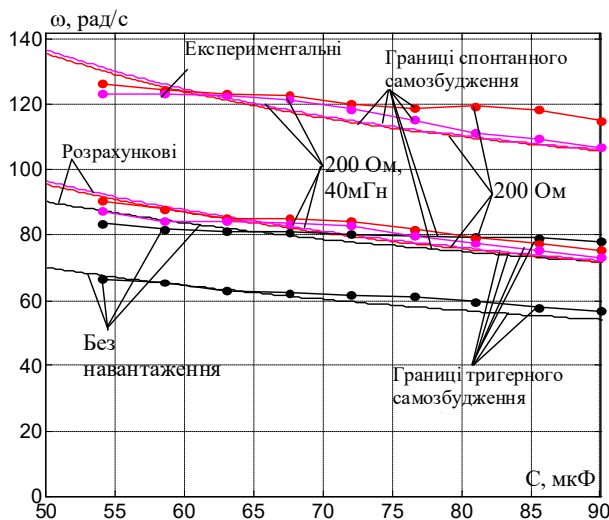


Рис. 12

Експериментальні та розрахункові границі самозбудження для випадку роботи АГ АИРМ63В4У3 без навантаження, активного навантаження 200 Ом та активно-індуктивного 200 Ом і 40 мГн представлені на рис. 12, де позначені границі як спонтанного, так і тригерного самозбудження. На рис. 13 представлено графіки амплітуди генерованої напруги АГ АИРМ63В4У3 при різних значеннях ємності та опору навантаження. З наведених графіків видно, що розбіжність між експериментальними та розрахунковими кривими є прийнятною.

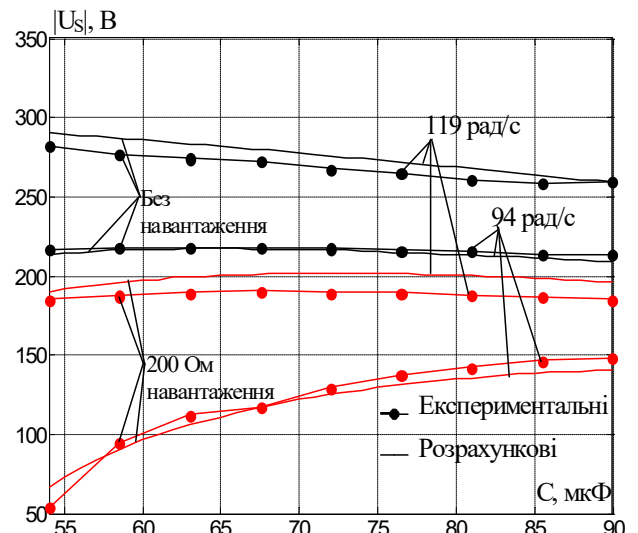


Рис. 13

Експериментальна установка за схемою, представленою на рис. 14, була створена автором з метою апробації отриманих в роботі аналітичних залежностей.

тей для АГ, який працює в автономній системі генерації електричної енергії з електронним регулятором навантаження (ЕРН).

АГ приводиться в обертання за допомогою приводного двигуна М, швидкість обертання якого підтримується постійною. Для самозбудження АГ використовується паралельна батарея конденсаторів С. Величина навантаження під час роботи може змінюватись в діапазоні від 0 до 100 % відносно номінального значення. Електронний регулятор навантаження складається з випрямляча, фільтруючого конденсатора $C_{ЕРН}$ та баластного резистора $R_{ЕРН}$, який в залежності від величини навантаження комутується за допомогою електронного ключа VT. Сигнали керування ключем поступають від ШІМ контролера і визначаються за допомогою датчика напруги ДН. Конденсаторна батарея С в таких системах розраховується із умови самозбудження АГ при підключеному номінальному навантаженні. Завданням ЕРН є підтримка сталої величини навантаження АГ, що в свою чергу стабілізує величину генерованої напруги.

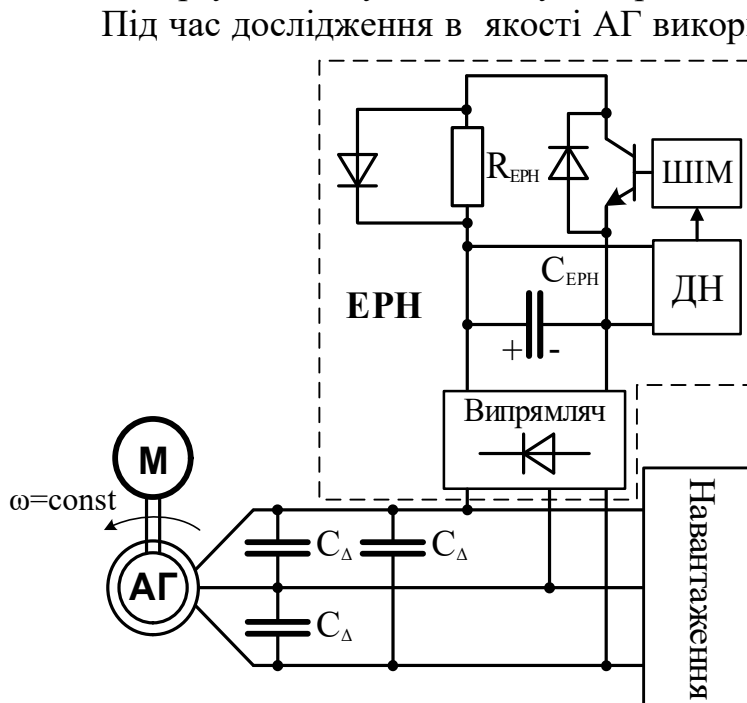


Рис. 14

машина АІР112М4У3 потужністю 5500 Вт, номінальною частотою обертання 1450 об./хв., для якої із застосуванням виразів (8) та (14) розраховано зони самозбудження та визначено ємність конденсаторної батареї для самозбудження АГ при різних навантаженнях. Робота системи АГ–ЕРН була перевірена шляхом математичного моделювання в MATLAB та експериментально.

При дослідженні використовувалась наступна послідовність операцій керування: за

час 0–0,2 с АГ під навантаженням розганяється до швидкості $\omega=157$ рад/с; на інтервалі часу 0,2–3,4 с АГ самозбуджується та виходить на стаке генерування вихідної напруги; на інтервалі часу 4–6 с відбувається скидання 50% навантаження.

Експериментальні графіки перехідних процесів представлено на рис. 15. Результати тестування свідчать про те, що розроблена система є роботоспроможною та забезпечує високу якість стабілізації вихідної напруги АГ.

Використання на етапі проектування отриманих в розділах 2 і 3 аналітичних залежностей значно спрощує вибір конденсаторів, дозволяючи безітераційно проводити розрахунки параметрів АСГ, що забезпечують номінальну напругу при різних навантаженнях, що є дуже важливим на етапі проектування АСГ.

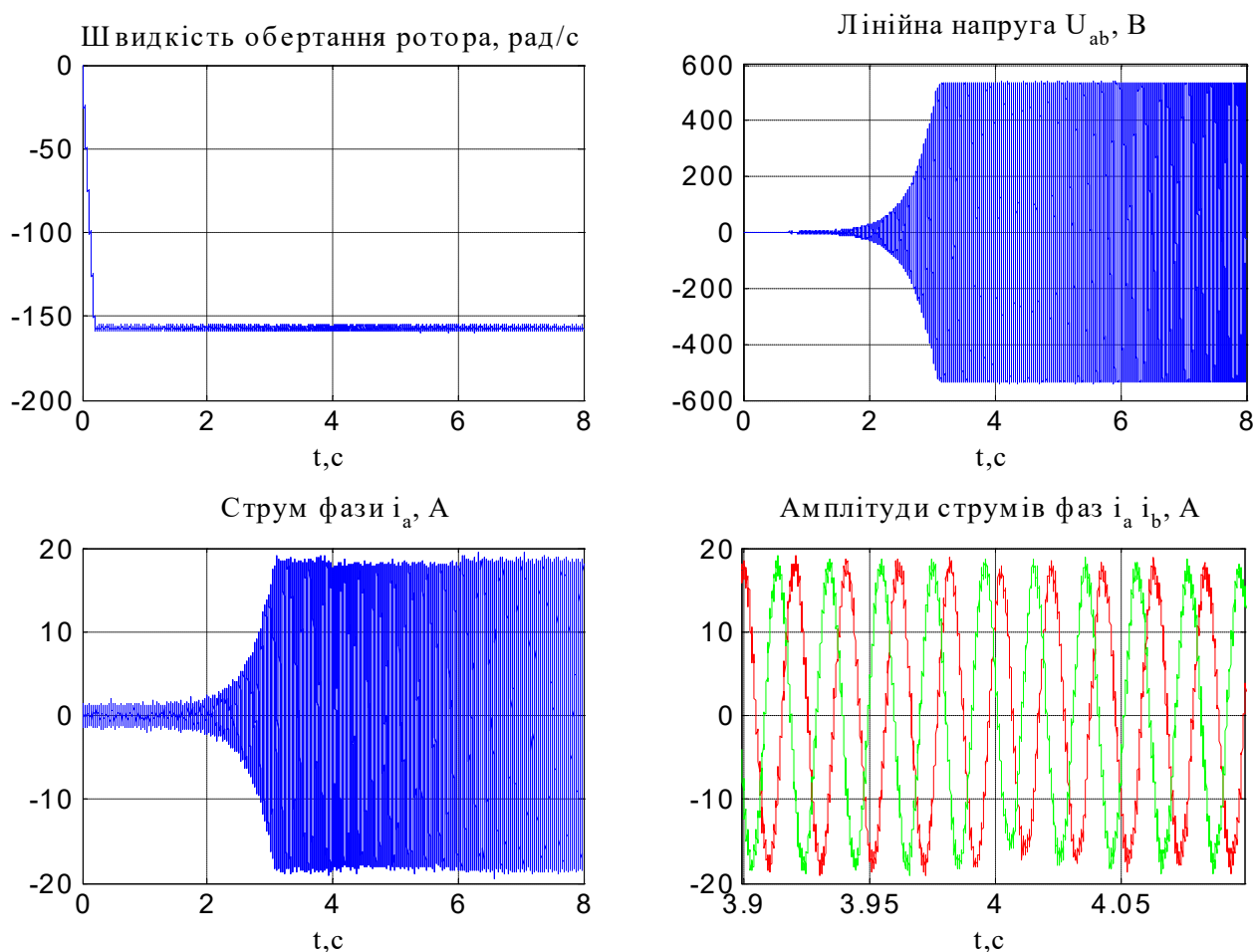


Рис. 15

У додатках представлено розроблені автором математичні моделі АСГ при роботі з активним та активно-індуктивним навантаженням, лістинг моделюючих програм, програм розрахунку зон самозбудження в середовищі MATLAB та акти впровадження результатів дисертації.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі отримав подальший розвиток метод аналізу процесів самозбудження АГ з використанням диференціальних матричних рівнянь і на цій основі розв'язано актуальну наукову задачу по встановленню аналітичних залежностей для зон самозбудження АГ, статичних залежностей його напруги та максимальної статичної перевантаженості, що є корисними при розробці алгоритмів керування параметрами автономних енергогенеруючих систем та мають суттєве значення для дослідження та аналізу процесів, які відбуваються в автономних системах генерування, а також для проектування нового високотехнологічного обладнання.

Основні наукові та практичні результати полягають в наступному:

1. Як показав огляд літературних джерел, аналіз робочих режимів асинхронних генераторів є досить складною задачею і не має на сьогоднішній день повного вирішення. Існуючі методи дослідження робочих режимів АГ базуються на застосуванні схеми заміщення та ітераційної процедури розрахунку її па-

раметрів. Такий підхід не дозволяє отримувати універсальні аналітичні залежності, за якими можна проводити дослідження процесів самозбудження та робочих режимів АГ на етапах розробки АСГ.

2. Розвинено теоретичний метод дослідження автономних систем генерування електричної енергії на основі асинхронних генераторів, який ґрунтується на положеннях теорії автоматичного керування з використанням диференціальних матричних рівнянь, за допомогою якого встановлено аналітичні залежності для статичних характеристик асинхронних генераторів з ємнісним самозбудженням, а також вирази для границь спонтанного та тригерного самозбудження асинхронних генераторів.

3. Досліджено вплив різних варіантів підключення конденсаторних батарей до асинхронного генератора на процес самозбудження та критичне навантаження генератора. Встановлено, що паралельне підключення конденсаторної батареї самозбудження є найбільш перспективним для використання в автономних енергогенеруючих системах на основі асинхронних генераторів з самозбудженням порівняно зі змішаним та послідовним підключеннями.

4. Вперше отримано та проаналізовано характеристики статичної переважаності асинхронних генераторів, встановлено взаємозв'язок між параметрами генератора та максимальною статичною переважаністю.

5. Отримано залежності критичних значень ємності конденсаторів самозбудження, швидкості АГ і навантаження при різних схемах підключення батарей самозбудження, в межах яких можлива стійка робота АСГ.

6. Сформульовано стратегію керування для досягнення максимуму статичної переважаності при роботі генератора, яка може бути використана при створенні керованих систем генерації на основі асинхронних генераторів з максимізацією генерованої потужності.

7. Проведено експериментальне дослідження статичних характеристик асинхронних генераторів та зон самозбудження. Проаналізовано та експериментально верифіковано отримані в роботі аналітичні вирази для напруги, частоти, потужності та зон самозбудження.

8. Створено дві лабораторні установки для дослідження статичних та динамічних характеристик автономних систем генерування електричної енергії на основі асинхронних генераторів та систем керування ними.

9. Створено комплекс моделюючих програм для дослідження статичних і динамічних характеристик автономних систем генерування та систем керування напругою асинхронних генераторів методом математичного моделювання.

10. Розроблено комплекс програмних та технічних засобів для дослідження і реалізації розроблених систем, за допомогою яких проведено повномасштабне тестування статичних і динамічних характеристик автономних енергогенеруючих систем, яке підтверджує їх ефективність та роботоспроможність.

11. Результати роботи, а саме отримані аналітичні залежності та рекомендації по їхньому використанню, а також методи дослідження асинхронних генераторів із самозбудженням і автономних енергогенеруючих систем на їх основі впроваджені ТОВ «Проектно-дизайнерське бюро «АТОН» при розробці нових автономних систем енергозабезпечення, ПП «Баркософт» при проекту-

ванні системи автономного електропостачання сільськогосподарського комплексу та використовуються в учбовому процесі Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», що підтверджено відповідними актами. Результати, отримані в дисертаційній роботі, можуть бути використані навчальними, проектними, науково-дослідними та промисловими установами для подальшого впровадження.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кіселичник О.І. Процеси самозбудження в автономних асинхронних генераторах зі змішаним самозбудженням/ О.І. Кіселичник, С.М. Пересада, М.В. Печеник, М.В. Пушкар // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 3. – С. 33–39.
2. O. Kiselychnyk Critical load of self-excited induction generators/ O. Kiselychnyk., M. Pushkar., M. Bodson// Електротехнічні та комп'ютерні системи. — 2011. — № 3 (79). — С. 282–285.
3. O. Kiselychnyk. Critical loads of induction generators with series self-excitation/ O. Kiselychnyk, M. Pushkar, M. Bodson // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Вип. 3/2012. – С. 48–52.
4. O. Kiselychnyk. Maximum power extraction from self-excited induction generator/ O. Kiselychnyk, J. Wang, M. Bodson, M. Pushkar // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Вип. 2/2014.– С. 70–77.
5. O. Kiselychnyk Maximum power extraction from self-excited induction generator/ O. Kiselychnyk, J. Wang, M. Bodson, M. Pushkar // Problems of energy and resource saving in electrical systems. Science, education and practice. Bulletin.-Kremenchuk: KrNU, 2014. – № 1/2014 (2). – Р. 59–61.
6. Пушкар М.В. Регулювання напруги асинхронних генераторів з самозбудженням за допомогою сімісторно-комутованої конденсаторної батареї / М.В. Пушкар, С.О. Бур'ян, В.В. Михайленко // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2014. – Вип. 39. – С. 52–56.
7. Печеник М.В. Регулювання напруги асинхронного генератора із самозбудженням за допомогою електронного регулятора навантаження / М.В. Печеник, В.С. Бовкунович, М.В. Пушкар // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 3/2015. – С. 82–88.
8. Kiselychnyk O. Steady-state and dynamic characteristics of self-excited induction generators with resistive-inductive loads/ Kiselychnyk O., Wang J., Bodson M., Pushkar M. // Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2014, 18-20 June 2014, Italy, P. 625–630.

АНОТАЦІЇ

Пушкар М.В. Самозбудження та регулювання в автономних системах генерації з асинхронними генераторами. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, 2016.

Дисертація присвячена питанням дослідження процесів самозбудження та електромеханічного перетворення енергії в автономних системах генерації (АСГ) електричної енергії на основі асинхронних генераторів (АГ) з конденсаторним самозбудженням.

Отримав розвиток метод аналізу процесів самозбудження АГ з використанням диференціальних матричних рівнянь, спрямований на підвищення якості регулювання напруги та потужності в АСГ на основі АГ з конденсаторним збудженням шляхом удосконалення підходів до керування параметрами АСГ, за допомогою якого були встановлені аналітичні залежності для статичних характеристик АГ, а також вирази для границь їх спонтанного та тригерного самозбудження.

Сформульовано стратегію керування для досягнення максимуму можливої статичної перевантаженості при роботі генератора, яка може бути використана при створенні керованих систем генерації на основі асинхронних генераторів з максимізацією генерованої потужності.

Встановлені в дисертаційній роботі аналітичні залежності можуть бути використані для наступних практичних застосувань: вирази для границь самозбудження та критичних навантажень можуть бути інкорпоровані в процес керування як обмеження для уникнення колапсу напруги і перезапуску генераторів; вирази для статичної перевантаженості – для обґрунтування автоматичних пошукових систем максимуму генерованої потужності; вирази для частоти та напруги – для можливого бездатчикового керування та безітераційного розрахунку необхідних параметрів, які забезпечують номінальну напругу, що необхідно на стадії проектування систем генерації електричної енергії на основі АГ.

Ключові слова: автономна система генерації, асинхронний генератор, конденсаторне самозбудження, система керування, статична перевантаженість.

Pushkar M.V. Self-excitation and regulation in autonomous power generating systems with induction generators. – Manuscript.

Thesis for a candidate degree of technical sciences on specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to the problems of investigation the self-excitation and electromechanical conversion processes in autonomous electrical power generating systems (APS) based on induction generators with capacitor self-excitation (SEIG).

A nonlinear dynamic model of SEIG was derived that enables a unified analysis of both the steady-state and transient characteristics of the machine. Steady-state operating modes are first determined, and self-excitation boundaries are derived.

Computations are straightforward and do not require iterations. The dynamic model was also used to compute the eigenvalues of the linearized system around an operating mode.

A method of analyzing the processes of SEIG self-excitation differential matrix equations received the further development. It is aimed at improving the quality of voltage and power regulation in APC based on SEIG. It was achieved by improving approaches of SEIG parameters control, which give the opportunity to define the analytical dependences for steady-state characteristic of SEIG and also the equations for the boundaries of spontaneous and triggered self-excitation.

First, the model of a SEIG with resistive-inductive load was derived in a compact form which is convenient for simulation and for analysis. Then, steady-state operating modes were computed from the roots of a polynomial equation. Formulas are given for the steady-state voltage and for the self-excitation boundaries. The stability of operating modes within the self-excitation boundaries was assessed through computations of the eigenvalues of the linearized system. Experimental data show good agreement with the results of computations using the analytic model. Computations also show that the addition of inductance results in general, but not always, in an enlarged set of operating conditions. Stability of the operating modes is also increased by the addition of inductance in the load.

Also the analytical dependences for non-iterative computation of the self-excitation boundaries of a three-phase autonomous induction generator were derived for short and long shunt capacitors configurations. The boundaries for the short and long shunt configurations were compared to the case of pure shunt excitation and between themselves. It was determined that the additional series capacitors make the boundaries wider. The long shunt provides wider boundaries than the short shunt. However, the short shunt ensures self-excitation at lower velocities. It was found that for specific operating conditions with long or short shunt configurations the decrease of the load may lead to the increase of the minimum required velocity for self-excitation and vice versa.

It was considered an approach for maximizing the power extracted from self-excited induction generators. The formulas for the steady-state generated power assuming the self-excitation boundaries were derived. Since an analytic search for a maximum of the power as a function of capacitance and load admittance is impossible, a numerical approach including 3-D computational and 2-D experimental results is used to show the existence of a global maximum of the power for a specific velocity in the capacitance - load admittance plane and within the self-excitation boundary. Therefore, the method allows one to take into account all possible operating points for this velocity. The implementation of maximum searching algorithms is discussed.

Besides the maximum load of a self-excited autonomous induction generator was derived as a function of velocity and capacitance. The maximum value of the capacitance and the minimum frequency were determined as well. Three-dimensional plots of self-excitation boundaries are presented for a practical example.

Obtained in the thesis analytical dependences can be used for the following practical applications: the expressions for self-excitation borders and critical loads can be incorporated into the control process as saturations to prevent voltage collapse

that could cause the restart of generators; equations for static congestion to justify automatic search of maximum generating power; formulas for frequency and magnitude of generated voltage control for possible sensorless control systems of SEIG and non-iterative computation of necessary parameters, providing nominal voltage that is needed at the design stage of the electrical power generating systems with SEIG.

Key words: autonomous power generating system, induction generator, self-excitation, control system, static congestion.

Пушкарь Н.В. Самовозбуждение и регулирование в автономных системах генерации с асинхронными генераторами. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Институт электродинамики НАН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена вопросам исследования процессов самовозбуждения и электромеханического преобразования энергии в автономных системах генерации (АСГ) электрической энергии на основе асинхронных генераторов (АГ) с конденсаторным самовозбуждением.

Получил развитие метод анализа процессов самовозбуждения АГ с использованием дифференциальных матричных уравнений, направленный на повышение качества регулирования напряжения и мощности в АСГ на основе АГ с конденсаторным самовозбуждением, путем усовершенствования подходов к управлению параметрами АСГ, с помощью которого были установлены аналитические зависимости для статических характеристик АГ, а также выражения для границ их спонтанного и триггерного самовозбуждения.

Сформулирована стратегия управления для достижения максимума возможной статической перегруженности генератора, которая может быть использована при создании управляемых систем генерации на основе асинхронных генераторов с максимизацией генерируемой мощности.

Установленные в диссертационной работе аналитические зависимости могут быть использованы для следующих практических применений: выражения для границ самовозбуждения и критических нагрузок могут быть инкорпорированы в процесс управления как ограничения во избежание коллапса напряжения и перезапуска генераторов; выражения для статической перегруженности – для обоснования автоматических поисковых систем максимума генерируемой мощности; выражения для частоты и напряжения – для возможного бездатчикового управления и безитерационного расчета необходимых параметров, обеспечивающих номинальное напряжение, что необходимо на стадии проектирования систем генерации электроэнергии на основе АГ.

Ключевые слова: автономная система генерации, асинхронный генератор, конденсаторное самовозбуждение, система управления, статическая перегруженность.